

(zmienne pole magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne). Zauważmy, że prawa Ampère’a i Faraday’a (Równ. 177 i 178) wykazują formalne podobieństwo matematyczne lub inaczej – symetrię (z wyjątkiem znaku minus w Równ. 176 ).

### Fale elektromagnetyczne

Zmienne pola elektryczne i magnetyczne generują się nawzajem. Jeśli zatem wytworzymy, np. zmienne pole magnetyczne, to w wyniku tego powstanie fala elektromagnetyczna. Równanie jej wyprowadza się oczywiście z równań Maxwella (czego tu nie będziemy robić). W fali elektromagnetycznej drganiom podlegają wektory **B** i **E**; fala ta nie wymaga ośrodka materialnego do swojej propagacji. Równanie różniczkowe fali elektromagnetycznej rozchodzącej się w kierunku osi x opisuje zależność na amplitudy pola magnetycznego i elektrycznego::

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2} \quad (179)$$

oraz

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (180)$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni ( $c=3 \cdot 10^8$  m/s).

Pola E i B są prostopadłe do siebie oraz do kierunku rozchodzenia się fali. Zauważmy, że powyższe równania mają analogiczną postać do poznanego przez nas wcześniej równania fali mechanicznej:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Rozwiązaniem Równ. 179 i 189 ma także postać analogiczną jak w przypadku fali mechanicznej:

$$\begin{aligned} B_z(x, t) &= B_{z(m)} \sin(kx - \omega t) \\ E_y(x, t) &= E_{y(m)} \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (181)$$

Pomiędzy stałymi  $\mu_0$  i  $\epsilon_0$  zachodzi fundamentalny związek, który otrzymuje się przy wprowadzeniu równania na falę elektromagnetyczną; jest on następujący:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (182)$$

Ponadto otrzymuje się następująca zależność:

$$\frac{E_m}{B_m} = c \quad (182)$$

Interesującą wielkością charakteryzującą falę elektromagnetyczną jest wektor Poyntinga:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (183)$$

Wyraża on szybkość przepływu energii przez jednostkową powierzchnię dla płaskiej fali elektromagnetycznej.

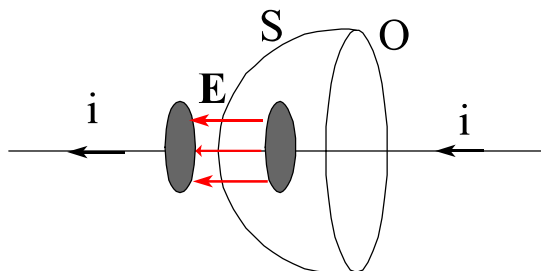
Częstotliwości ( $f=\omega/2\pi$ ) poznanych fal elektromagnetycznych rozciąga się w bardzo szerokim zakresie: od  $10^3$  Hz (fale radiowe długie) do  $10^{20}$  Hz (promieniowanie jądrowe gamma). Dodamy, że częstotliwości radiowe UKF oraz telewizyjne to  $10^8$  Hz, światło widzialne mieści się pomiędzy  $10^{14}$  i  $10^{15}$  Hz, zaś częstotliwości promieniowania rentgenowskiego są w zakresie  $10^{17}$  -  $10^{19}$  Hz.

### **DODATEK: Uzasadnienie rozszerzenia prawa Ampère'a**

Rozważmy kondensator, na którego okładki wpływa prąd elektryczny  $i$  (czyli kondensator jest ładowany). Wokół przewodnika z prądem narysujmy okrąg  $O$ , przez który przechodzi przewodnik z prądem o natężeniu  $i$ . Prawo Ampère'a stwierdza, że:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i \quad (180)$$

A teraz na tym samym okręgu  $O$  rozepnijmy wygiętą powierzchnię  $S$ , w ten sposób, że przechodzi na między okładkami kondensatora. Zauważmy, że powierzchnia ta nie przecina przewodnika z prądem, niemniej wartość całki po okręgu  $O$  jest niezmienną. Natomiast przez powierzchnię  $S$  przechodzi pole elektryczne.



Natężenie pola elektrycznego między okładkami kondensatora:  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$ , zaś jego strumień:

$$\Phi_E = ES = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Wyliczmy wielkość  $\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi}{dt}$ :

$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 \frac{dQ}{dt} = \mu_0 i$$

Wyrażenie to jest dokładnie równe prawej stronie Równ. 180. A zatem, gdy w prawie Ampère'a dodamy ten człon:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (181)$$

to rozszerzone równanie jest zawsze spełnione, niezależnie od tego jaki kształt ma powierzchnia rozpięta na konturze całkowania  $O$ . Oczywiście poszerzona postać prawa Ampère'a jest prawdziwa w dowolnej ogólnej sytuacji, a nie tylko w modelowym rozważaniu przedstawiony powyżej. Sens fizyczny tego rozszerzenia jest następujący:

**Przewodniki z prądem oraz zmienne pola elektryczne wytwarzają wirowe pole magnetyczne.**